Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال سی و دوم، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۳۹۵ تا ۴۰۸

بررسی ریزساختار کانی‌ها و الگوی جایگیری توده گرانیتوئیدی گراغه بر اساس ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS)

نازنین سرحدی[۱]، مهدی رضائی کهخائی[*۱]،یورو شی[۲]، موریل ارمبرت[۳]، حبیب الله قاسمی[۱]، محمود صادقیان[۱]

۱- *گروه پترولوژی و زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران*

۲- *موسسه زمین شناسی، آکادمی علوم زمین چین، پکن، چین*

۳- *دانشکده علوم زمین، دانشگاه اسلو، اسلو، نروژ*

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۹/۲۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۲)

چکیده: توده گرانیتوئیدی گراغه در ۹۰ کیلومتری شمال غرب زاهدان و در شمال‌غربی ترین بخش از نوار ماگمایی زاهدان- سراوان قرار دارد. این توده بیشتر از سنگ‌های بیوتیت گرانیت و گرانودیوریت تشکیل شده است. سنگ‌های تشکیل دهنده بخش‌های شمالی و جنوبی توده دارای بافت‌های ماگمایی- نیمه ماگمایی هستند. افزون بر آن، این توده دگرشکلی‌های دماهای پایین تا بالا چون جوانه زدن و خاموشی صفحه شطرنجی در کوارتز، بافت میرمیکیتی و لغزش در ورقه‌های بیوتیت را نشان می‌دهد. برای بررسی ناهمسانگردی مغناطیسی، تعداد ۵۱۹ مغزه جهت‌دار از ۷۰ ایستگاه تهیه شد. کانی بیوتیت در این توده عامل اصلی ایجاد پذیرفتاری مغناطیسی بوده که مقدار آن در بخش‌های مختلف توده متغیر است. میانگین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی مغزه‌های تهیه شده بین ۱۰ تا ۳۰۱ µSI متغیر است. فاکتور دگرشکلی آن‌ها (P) بین ۰/۸ تا ۱۵/۵ درصد متغیر است. متغیر شکل در بیشتر نمونه‌ها دارای مقادیر مثبت و شکل کلوچه‌ای است. شیب برگوارگی‌های مغناطیسی در سراسر توده بطور متوسط ۳۱ تا ۶۰ درجه بوده و روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق را نشان می‌دهند. موازی بودن راستایی برگوارگی‌ها با حاشیه توده و وجود سنگ‌های دگرگونی مجاورتی نشان می‌دهد که هنگام تزریق ماگما، بیوتیت گرانیت و گرانودیوریت موازی با لایه بندی سنگ میزبان جای گرفته‌اند. خطواره‌های مغناطیسی با شیب زیاد محل اصلی تزریق ماگما تشکیل دهنده توده گرانیتوئیدی گراغه را نشان می دهند که در مرکز توده قرار دارد؛ و سایر بخش‌ها می‌توانند محل‌های فرعی ماگمای تغذیه کننده توده باشد. بر پایه شواهد صحرایی و مغناطیسی به دست آمده، به نظر می رسد که ماگمای مادر توده گرانیتوئیدی گراغه بصورت لاکولیت با شیب ۴۵ درجه در راستایی شمال‌شرق به درون سنگ‌های میزبان و موازی با لایه بندی آنها جایگیری کرده است.

واژه‌های کلیدی: *نوار ماگمایی زاهدان- سراوان؛ بافت ماگمایی؛ ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS).*

مقدمه

روش ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) روشی بسیار ساده، دقیق، سریع و کم هزینه برای بررسی ساختار توده‌های گرانیتوئیدی است، زیرا می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد سازوکارهای استقرار توده و زمین ساخت منطقه ارائه دهد [۱-۶]. این روش بر پایه تعیین پارامترهای مغناطیسی (Magnetic Fabric) است. پارامترهای روش AMS بر پایه کانی‌های مغناطیسی هستند. همچنین در روش AMS با اندازه‌گیری متغیرهای K_1، K_2، K_3 می‌توان برگوارگی و خطوارگی مغناطیسی، درجه ناهمسانگردی مغناطیسی، متغیر شکل و دیگر متغیرهای مورد نیاز را محاسبه کرد و در تفسیر وضعیت زمین ساختی و جایگیری توده‌ها از آن‌ها استفاده نمود. نخستین بار صادقیان و همکاران [۷] برای گرانیتوئیدهای بخش‌های مرکزی نوار ماگمایی زاهدان سراوان از روش AMS

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۰۷۳۹۴۴۰، پست الکترونیکی: rezaei@sharoodut.ac.ir

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]

استفاده کردند. در این پژوهش، اثر دگرشکلی بر ریزساخت‌های ماگمایی و بازسازی سازوکار جایگیری توده گرانیتوئیدی گراغه (شمال نوار ماگمایی زاهدان- سراوان) با روش AMS بررسی شده است.

زمین شناسی منطقه

پهنه جوش خورده سیستان از دو مجموعه افیولیتی رَتوک و نِه تشکیل شده است که حوضه رسوبی سفیدآبه آن‌ها را از هم جدا می‌کند [۸]. مجموعه‌های رَتوک و نِه دارای افیولیت‌هایی به سن کرتاسه، فلیش‌های دگرگونه با سن کرتاسه تا ائوسن (فیلیت) و سنگ‌های رسوبی- آواری قاره‌ای ژرف با سن پالئوژن هستند. حوضه سفیدآبه نیز از سنگ‌های آواری و کربناتی سنومانین تا ائوسن با ضخامت حدود ۸ کیلومتر و کمی افیولیت تشکیل شده است [۸، ۹].

نوار گرانیتوئیدی زاهدان- سراوان به سن ائوسن- میوسن [۱۰-۱۲] به شکل بیضی کشیده، از توده‌های نفوذی با اندازه‌های متفاوت (باتولیت تا استوک) تشکیل شده است. این نوار به طول ۲۵۰ کیلومتر و عرض ۲ تا ۲۵ کیلومتر، از کوه گراغه در شمال غرب زاهدان تا نره نو ادامه دارد و بین عرض‌های °۳۰-۲۸ شمالی و °۶۲-۶۰ شرقی واقع است [۷] (شکل ۱). رخنمون‌های این نوار گرانیتوئیدی از شمال‌غرب به جنوب‌شرق شامل گرانیتوئید گراغه، گرانیتوئید گپدان، گرانیتوئید زرگلی، گرانیتوئید لخشک، گرانیتوئید لوچان وگرانیتوئید چشمه بید و چند رخنمون پیوسته هستند. توده گرانیتوئیدی گراغه از نظر جغرافیایی در ۹۰ کیلومتری شمال غرب زاهدان و در بالاترین بخش از نوار ماگمایی زاهدان- سراوان قرار دارد. این توده درون سنگ‌های فلیشی به سن ائوسن نفوذ کرده و سبب ایجاد طیفی از سنگ‌های دگرگونی بیوتیت شیست، آمفیبول شیست، ماسه سنگ تیره دگرگونه شده است (شکل ۲ الف). این توده از نظر سنگ‌شناسی به دو دسته بیوتیت گرانیت به سن ۴۴٫۵±۰٫۷ میلیون سال و گرانودیوریت به سن ۴۴٫۳±۰٫۶ میلیون سال تقسیم می‌شود [۱۲]. دو فاز سنگی سازنده توده گرانیتوئیدی گراغه بیشتر به رنگ خاکستری متوسط تا تیره دیده می‌شوند (شکل ۲ ب) که پس از جایگیری بخش‌هایی از آن‌ها دچار میلونیت‌زایی شده‌اند (شکل ۲ پ). این میلونیت زایی بیشتر در حاشیه توده دیده می‌شود (شکل ۲ ت). در بخش‌های شمالی توده، قرارگیری مگاکریست‌های بلورهای فلدسپار پتاسیم سبب ایجاد برگوارگی‌های ماگمایی شده است (شکل ۲- ث). همچنین آثاری از ساختارهای S-C در سنگ‌های بیوتیت شیست دیده می‌شود (شکل ۲ ج). درون این سنگ‌ها برونبوم‌های رسوبی و آذرین وجود دارد که در برخی از آن‌ها ساختارهای نوع σ را می‌توان تشخیص داد (شکل ۲ چ).

پارامترهای مغناطیسی

آشنایی با مفاهیم بافت مغناطیسی از جمله برگوارگی و خطوارگی مغناطیسی، پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) و درجه ناهمسانگردی مغناطیسی (P)، متغیر شکل (T) در روش AMS مهم است. پذیرفتاری مغناطیسی (K) میزان مغناطیسی شدن کانی‌ها در میدان القایی ضعیفی شبیه میدان مغناطیسی زمین است که بصورت نسبت مغناطش القایی (با یکای واحد آمپر بر متر) به میدان مغناطیسی به کار رفته (با یکای واحد آمپر بر متر) تعریف می‌شود $K=H/M$. در این رابطه K ضریب حساسیت مغناطیسی بوده و شیب نمودار M نسبت به H است. بردارهای مغناطیسی در یک فضای بیضوی سه بردار K_{min}، K_{int} و K_{max} هستند که K_{min} کوچکترین محور بیضوی بعنوان قطب برگوارگی مغناطیسی، K_{int} محور متوسط بیضوی و K_{max} بزرگترین محور آن بعنوان خطوارگی مغناطیسی تعریف می‌شوند [۸، ۱۳].

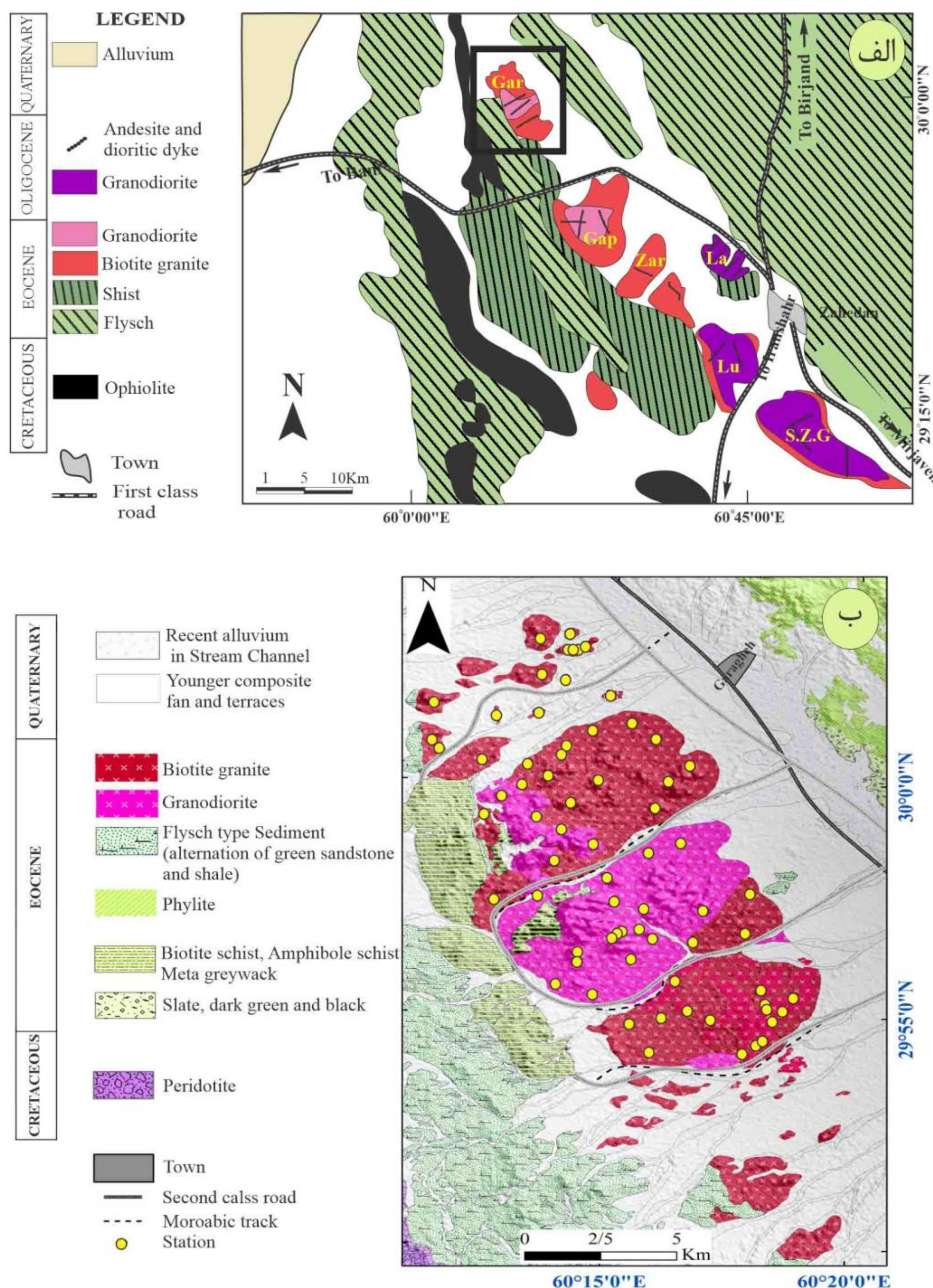
پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) از مهم‌ترین پارامترهای مغناطیسی است که درصد فراوانی کانی‌های مغناطیسی را مشخص می‌کند. این متغیر از رابطه $K=(K_1+K_2+K_3)$ محاسبه شده و بر پایه SI و μSI تعریف می‌شود [۱۳].

پارامتر درجه ناهمسانگردی مغناطیسی (P) مقادیر بزرگترین محور بیضوی مغناطیسی (K_1) و کوچکترین محور آن (K_3) است که بصورت $P=K_1/K_3$ بیان می‌شود. وقتی $K_1=K_2=K_3$ باشد، مقدار P برابر با ۱ و تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی همسانگرد است و بیضوی به شکل کره در می‌آید. در طبیعت چنین حالتی کمتر دیده می‌شود. برای بیشتر کانی‌ها، P دارای مقدار ۱٫۷ -۱ است [۱۴].

متغیر شکل (T) شکل بیضوی مغناطیسی را بر پایه وضعیت بردارهای پذیرفتاری مغناطیسی توصیف می‌کند. مقدار

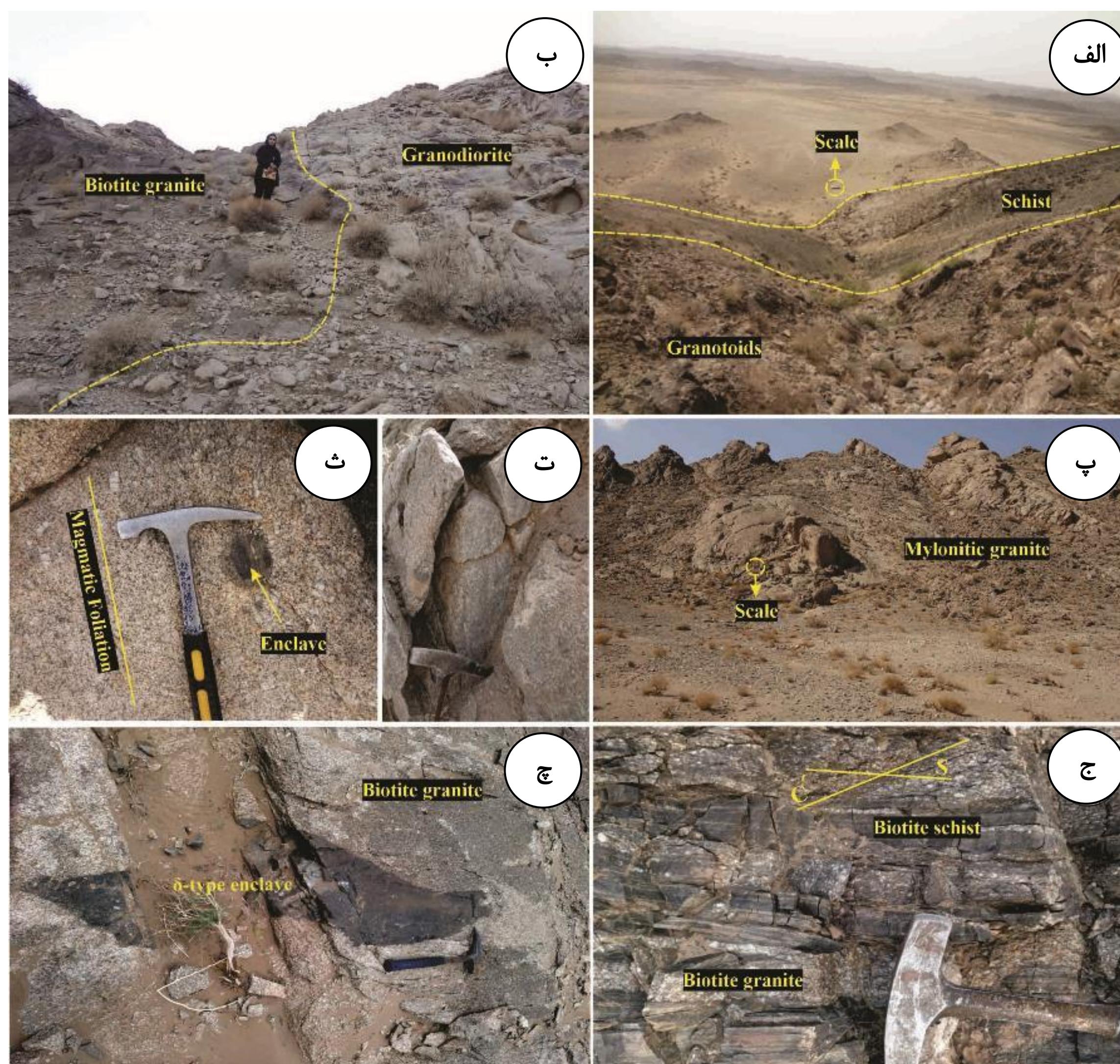
[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]

این پارامتر بین ۱- تا ۱+ تغییر می‌کند. اگر T بین ۰ تا ۱- باشد، بیضوی مغناطیسی دارای شکل دوکی یا سیگاری (Prolate) بوده، در این حالت $K_1>>K_2\geq K_3$ است. اگر T در گستره ۰ تا ۱+ باشد، شکل بیضگون مغناطیسی کلوچه‌ای (Oblate) بوده و $K_1\geq K_2>>K_3$ است [۱۴]. همچنین اگر $K_1=K_2=K_3$ باشد، شکل بیضوی مغناطیسی همانند کره است [۱۵].



شکل ۱ الف) نقشه ساده شده زمین‌شناسی نوار ماگمایی زاهدان-سراوان و موقعیت توده گرانیتوئیدی گراغه [۱۶] (Gar= گراغه، Gap= گپدان، Zar= زرگلی، La= لخشک، Lu= لوچان، S.Z.G= گرانیتوئیدهای زاهدان جنوبی). ب) نقشه زمین شناسی توده گرانیتوئیدی گراغه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]



شکل ۲ الف) نمای کلی از گرانیتوئیدها و سنگ‌های دگرگونی منطقه، دید به سمت شمال شرق. ب) دو فاز اصلی سنگی بیوتیت گرانیت و گرانودیوریت در توده گراغه. پ) گرانیتوئیدهای میلیونیتی شده، دید به سمت شمال. ت) نمایی از بیوتیت گرانیت‌های میلونیتی شده در حاشیه توده گرانیتوئیدی گراغه. ث) برگوارگی ماگمایی در سنگ‌های بیوتیت گرانیت بخش شمالی توده. ج) ساختار S-C در بیوتیت گرانیت‌های پیرامون توده گرانیتوئیدی گراغه. چ) برونبوم رسوبی با ساختار σ در بیوتیت گرانیت‌های توده گراغه.

روش کار

نمونه‌برداری و حفاری

در شروع کار، رخنمون‌هایی از سنگ‌ها برای مغزه‌گیری انتخاب شدند که تا حد امکان بدون درزه، شکاف و هوازدگی بودند. سپس با یک دستگاه مغزه‌گیر قابل حمل با سوخت بنزین عملیات مغزه‌گیری انجام شد. با این دستگاه، مغزه‌های جهت‌داری به طول ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی متر برداشت گردید. سپس با دور کردن همه وسایل مغناطیسی، روند و شیب این مغزه‌ها پیش از جدا کردن آن‌ها از درون توده سنگی اندازه‌گیری شد. همچنین مختصات جغرافیایی هر ایستگاه با سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت گردید (شکل‌های ۳ الف تا ح). مغزه‌های جهت‌دار به کارگاه سنگ در دانشگاه صنعتی شاهرود انتقال یافته و به اندازه‌های ۲۲ میلی متر با دستگاه برش داده شدند تا برای استفاده در دستگاه سنجش پذیرفتاری مغناطیسی در آزمایشگاه ژئومغناطیس دانشگاه صنعتی شاهرود آماده شوند. از ۷۰ ایستگاه نمونه‌برداری، ۵۱۹ مغزه جهت‌دار تهیه شد.

کارهای آزمایشگاهی

طی حفاری به دلیل قرارگیری ذرات آهن‌دار بر بدنه مغزه، احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری وجود دارد. از این رو، مغزه‌ها

با اسیدکلریدریک ۰/۱ نرمال شستشو داده شد. برای اندازه‌گیری مشخصه‌های مغناطیسی از دستگاه مغناطیس سنج مدل MFK1-FA (Multi Functions Kappabridge-FA) استفاده شد. نمونه‌ها در سه راستای، پیرامون محورهای X، Y و Z در دستگاه قرار داده شده و پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها اندازه‌گیری گردید (شکل‌های ۳ الف تا پ). داده‌ها با فرمت Ran ثبت و با نرم افزار Anisoft 5 تحلیل شدند. به منظور رسم نقشه‌های مورد نیاز برای تحلیل بهتر داده‌ها، از نرم افزار Arc GIS 9.3 نیز استفاده شد.



شکل ۳ تصاویری از چگونگی مغزه‌گیری: الف) پیدا کردن محل مناسب برای حفاری و دستگاه مغزه‌گیر، ب) حفاری در محل که با خط مشخص شده است، پ) قراردادن ترازیاب، ت) برداشت میل و چگونگی برداشت جهت میل مغزه، ث) مغزه برداشت شده از ایستگاه، ج) قراردادن مغزه‌ها در کیسه نایلونی ویژه، چ) قرارگیری نمونه‌های برش خورده با طول ۲۲ میلیمتر در محلول ۰/۱ نرمال اسیدکلریدریک، ح) خشک کردن نمونه‌ها برای قرارگیری در دستگاه مغناطیس‌سنج.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]

بحث و بررسی

سنگ‌نگاری

توده گرانیتوئیدی گراغه از سنگ‌های بیوتیت گرانیت و گرانودیوریت با اندازه کانی‌های متوسط تا درشت تشکیل شده است. در این سنگ‌ها، کانی‌های درشت فلدسپار و لخته‌هایی از کانی‌های بیوتیت دیده می‌شود.

بافت بیوتیت گرانیت‌ها دانه‌ای است و بافت‌های پرتیتی، میرمیکیتی و پوئی‌کیلیتیک نیز در آن‌ها دیده می‌شود. کانی‌های اصلی شامل کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و بیوتیت بوده و این واحدها دربردارنده کانی‌های فرعی متنوعی چون آپاتیت، آلانیت، زیرکن، اکسیدهای آهن- تیتانیوم هستند. کانی‌های ثانویه کلریت و سریسیت نیز در بعضی مقاطع دیده می‌شوند.

گرانودیوریت‌ها بافت دانه‌ای دارند و گاهی بافت‌های فرعی پرتیتی، گرانوفیری، میرمیکیتی، پوئی‌کیلیتیک و گلومروپورفیری نیز در آنها دیده می شوند. بلورها در این سنگ‌ها کوچک‌تر از بیوتیت گرانیت‌ها هستند. سنگ‌های گرانودیوریتی شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم ، بیوتیت ± هورنبلند و کانی‌های فرعی چون آپاتیت، آلانیت، زیرکن و اکسیدهای آهن- تیتانیوم هستند.

بررسی‌های ریز ساختاری

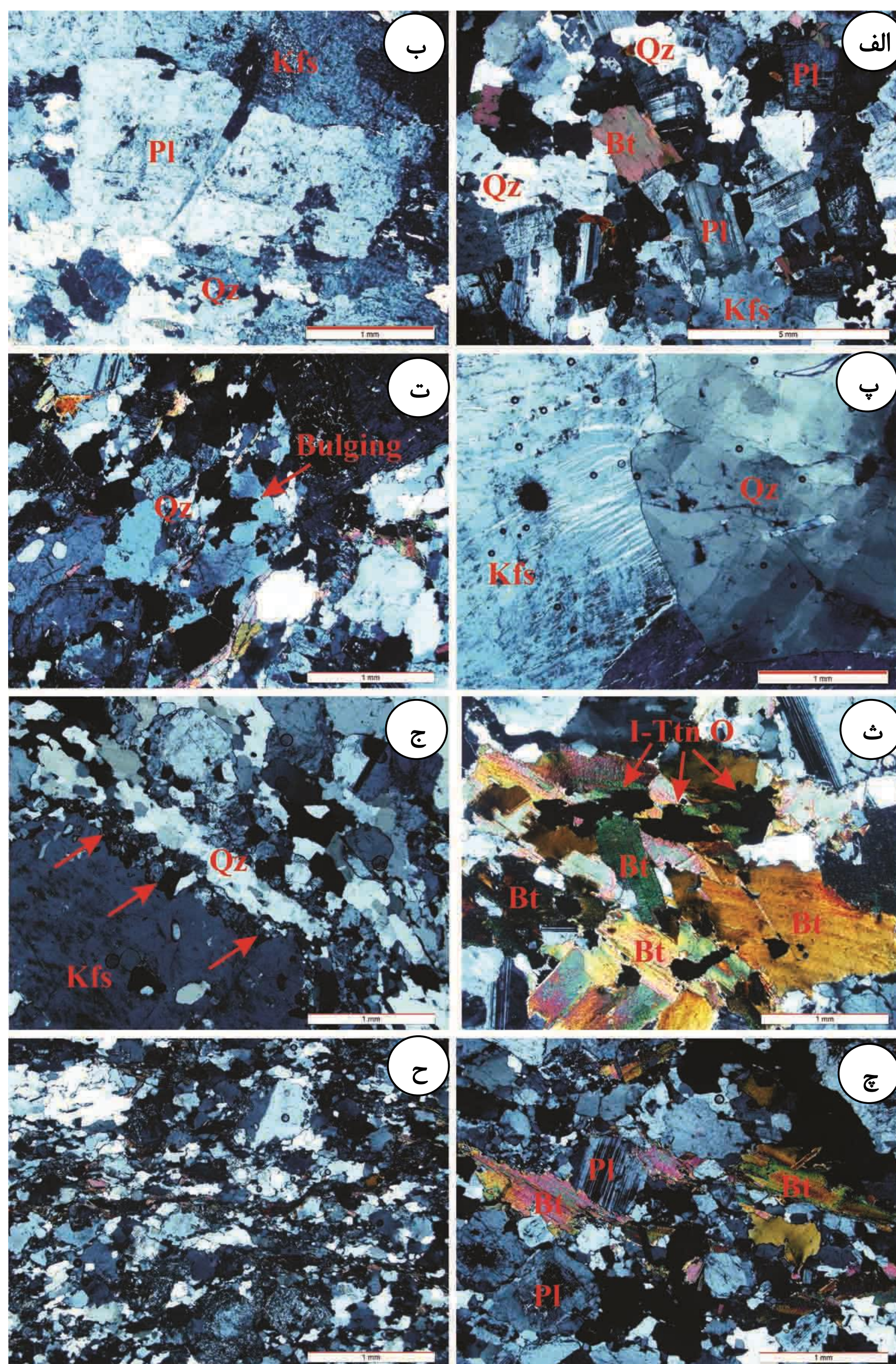
بیشتر بخش‌های شمالی توده گرانیتوئیدی گراغه دارای ریزساخت‌های ماگمایی هستند که با قرارگیری موازی کانی‌های فلدسپار مشخص می‌شوند (شکل ۲ ث). در این سنگ‌ها بلورهای پلاژیوکلاز بصورت خودشکل هستند و کانی‌های درشت منطقه‌بندی دارند. همچنین ارتوکلاز پرتیتی و بیوتیت‌ها بدون تغییر شکل هستند (شکل ۴ الف). بافت‌های نیمه ماگمایی بیشتر در بخش‌های مرکزی توده دیده می‌شوند و با پرشدگی شکستگی‌های موجود در پلاژیوکلازها با کانی‌های کوارتز قابل شناسایی هستند (شکل ۴ ب). بافت‌های ماگمایی و نیمه ماگمایی اغلب در بیوتیت گرانیت‌های موجود در بخش‌های شمالی و جنوبی توده دیده می‌شوند.

در توده گرانیتوئیدی گراغه، بررسی‌های ساختاری و ریزساختاری رخداد تغییر شکل‌های حالت جامد را در دماهای پایین تا متوسط نشان می‌دهد. ساختارها از این نظر یکنواخت نیستند، زیرا برخی از نمونه‌ها دگرشکلی بیشتر و برخی دگرشکلی کمتری را نشان می دهند. در بعضی جاها نیز سنگ‌های با دگرشکلی دمای متوسط در معرض دگرشکلی‌های دما پایین قرار گرفته‌اند. از شواهدی که می‌تواند حاکی از دگرشکلی حالت جامد دما پایین تا بالا در این سنگ‌ها باشد می‌توان به خاموشی موجی، صفحه شطرنجی (دمای ۳۷۰ درجه سانتیگراد، شکل ۴ پ) و جوانه زدن (Bulging) در کانی‌های کوارتز اشاره نمود (شکل ۴ ت). همچنین بیوتیت‌ها به اکسیدهای آهن و تیتان تجزیه شده‌اند (شکل ۴ج). از ویژگی کانی‌ها که نشانگر دگرشکلی حالت جامد در دمای متوسط تا بالاست [۱۷] می‌توان به بافت پرتیتی (دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد، شکل ۴ پ) و وجود بافت میرمیکیتی (۶۰۰-۴۵۰ درجه سانتیگراد) بعنوان یک بافت تغییر شکل [۱۸] (شکل ۴ ث) در این سنگ‌ها اشاره نمود. همچنین، گاهی بیوتیت‌ها در بخش‌های شرق و غرب توده دگرشکل شده و بصورت میکاماهی در زمینه سنگ دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ ج تا ح).

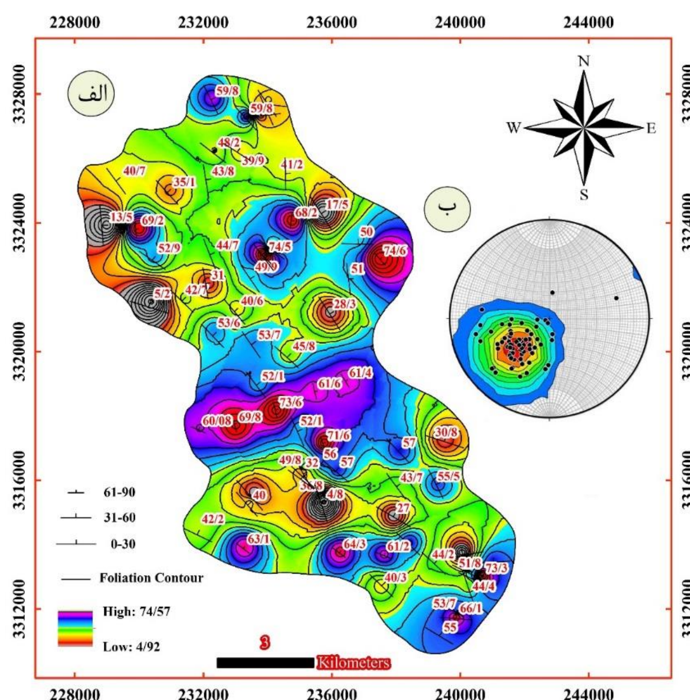
بررسی‌های مغناطیسی

پس از آماده سازی و بررسی نمونه‌ها، بر پایه داده‌های مغناطیسی به دست آمده، نقشه‌های برگوارگی و خطوارگی مغناطیسی، متغیر شکل، درجه ناهمگنی مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی میانگین رسم شد. که در ادامه تحلیل می‌شوند.

برگوارگی مغناطیسی اغلب در توده گرانیتوئیدی گراغه دارای راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب است. در چند ایستگاه نیز در حاشیه‌های بخش شمال‌غرب و جنوب غرب توده، برگوارگی راستای شرقی- غربی دارد. در بخش‌های جنوبی، بخش مرکزی و حاشیه بخش شمال‌شرق توده گرانیتوئیدی گراغه، برگوارگی‌های مغناطیسی دارای شیب به نسبت زیادی (۶۱٫۲ تا ۷۴٫۶ درجه) بویژه در محل رخنمون گرانودیوریت‌ها هستند. شیب برگوارگی‌های مغناطیسی در سراسر توده بطور متوسط بین ۳۱ تا ۶۰٫۸ درجه است و روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق را نشان می‌دهند. در حاشیه‌های توده، شیب برگوارگی مغناطیسی کاهش می‌یابد و مقدار آن بین ۴٫۸ تا ۳۰٫۸ درجه متغیر است. در حاشیه‌های بخش‌های غرب و شمال‌غرب توده، برگوارگی مغناطیسی موازی با تورق سنگ‌های دگرگونی میزبان توده است. هم روند بودن مرز توده و برگوارگی سنگ میزبان نشان می‌دهد که ماگماهای گرانودیوریتی و بیوتیت گرانیتی تشکیل دهنده توده موازی با لایه‌بندی سنگ میزبان جای گرفته‌اند (شکل ۵ الف). برای ارزیابی دقیق‌تر و نشان دادن تغییرات هر یک از پارامترها، نمودارهای پربندی نیز رسم شده‌اند (شکل ۵ ب).



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی انواع ریزساخت‌ها در سنگ‌های توده گرانیتوئیدی گراغه در نور قطبیده متقاطع (XPL): الف) بافت ماگمایی که با بلورهای تخته‌ای شکل پلاژیوکلاز، کانی‌های سالم کوارتز و بیوتیت مشخص می‌شود. ب) بافت نیمه ماگمایی که در آن، پلاژیوکلاز شکسته شده و با کوارتز ± فلدسپار پتاسیم پر شده است، پ) خاموشی صفحه شطرنجی کوارتز و بافت پرتیتی، ت) کوارتزهای دگرشکل شده با مرزهای دندانه‌دار، ث) تیتانومگنتیت در بلورهای بیوتیت. ج) بافت میرمیکتی (به راستاهای پیکان‌ها دقت نمایید)، چ و ح) بیوتیت‌های دگرشکل شده که بصورت میکا ماهی در آمده‌اند. نشانه‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۱۹] هستند.

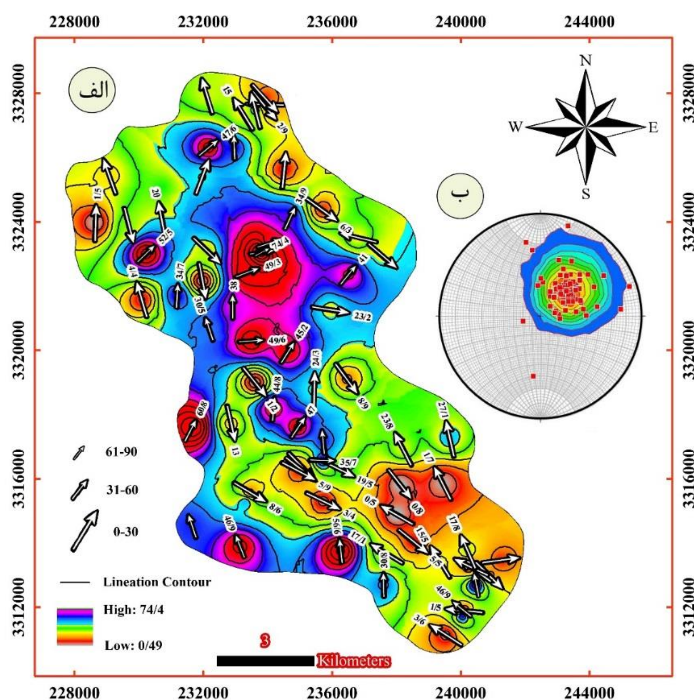


شکل ۵ الف) نقشه تغییرات شیب برگواره‌های مغناطیسی. ب) برجسته‌نگار نشانگر قطب برگواره‌ها و نمودار پربندی آن‌ها در توده گرانیتوئیدی گراغه.

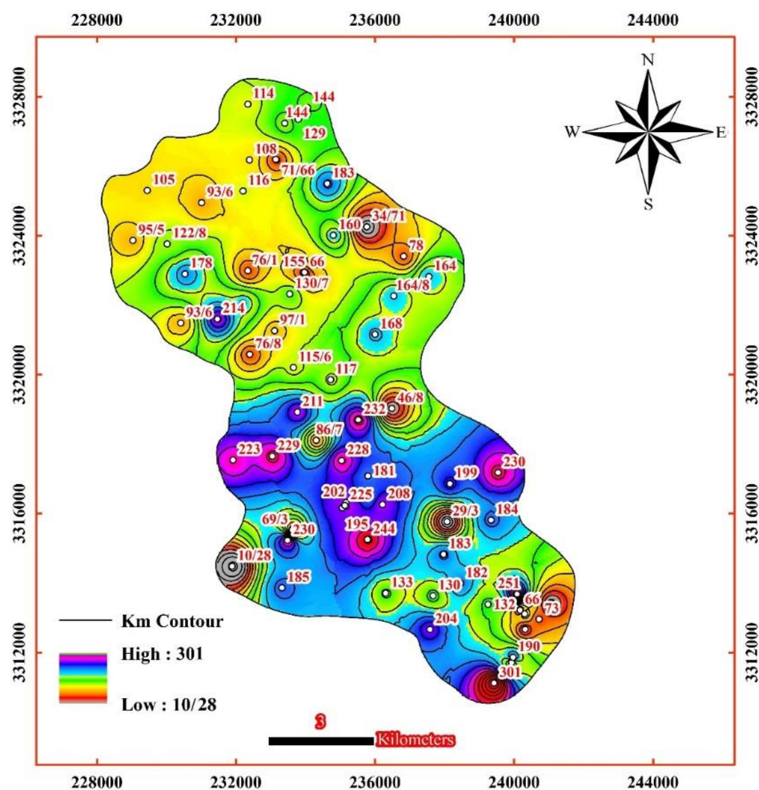
خطوارگی مغناطیسی در بخش‌های جنوبی و شمالی توده گرانیتوئیدی گراغه اغلب در راستایی شمال‌غرب- جنوب‌شرق آرایش یافته‌اند و دارای میل کمتری بین ۱٫۰ تا ۲۷٫۹ هستند. در بخش میانی توده، تمرکز خطواره‌های با مقدار میل بالا بین ۳۰٫۵ تا ۷۴٫۴ متغیر است و بیشتر روندهای شمالی- جنوبی و شمال‌شرق- جنوب‌غرب نشان می‌دهند و در چند ایستگاه، روند شرقی- غربی دارند. در توده مورد بررسی، مناطق دارای خطواره‌های مغناطیسی با میل زیاد به احتمال بسیار بر محل‌های حضور پهنه‌های تغذیه کننده منطبق هستند (شکل ۶).

پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (km) متغیر دیگر مورد بررسی است. در نقشه‌های پهنه‌بندی در حاشیه شرق، جنوب شرق و جنوب غرب توده گرانیتوئیدی گراغه، اغب مقادیر Km پایین و حدود ۱۰٫۲۸ تا µSI ۷۳ است. در بخش‌های جنوبی، مقدار Km بیشترین فراوانی را نشان داده و به µSI ۳۰۱ می‌رسد. در سایر بخش‌های شمالی توده، مقادیر Km بیشتر از ۹۳٫۶ تا µSI ۱۸۶ متغیر هستند. با توجه به مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی میانگین در هر ایستگاه، نقشه پذیرفتاری مغناطیسی میانگین رسم شد (شکل ۷). مناطق با پذیرفتاری مغناطیسی میانگین بزرگتر از نظر کانی‌شناسی با فراوانی بیوتیت و هورنبلند و حضور فازهای آهن‌دار و کدر چون مگنتیت (بسیار ناچیز) همخوانی دارند. مناطق با پذیرفتاری مغناطیسی پایین نیز دارای کانی بیوتیت کمتری هستند. به نظر می‌رسد که کانی بیوتیت در این توده عامل اصلی پذیرفتاری مغناطیسی است.

درجه ناهمسانگردی مغناطیسی (ρ) در سنگ‌های مورد بررسی در گستره ۰٫۸ تا ۱۵٫۵ درصد متغیر است. با توجه به نمودار توزیع کلی درصد ناهمسانگردی مغناطیسی، در ۲۶ ایستگاه در بخش‌های شرقی و جنوبی توده، P دارای بیشترین مقدار بین ۷ تا ۱۵٫۵ درصد است (شکل ۸). دگرشکلی‌ها در بخش‌های شمالی توده کمینه هستند و مقدار P بین ۰٫۸ تا ۳٫۳ درصد متغیر است. سنگ‌ها در این منطقه، کمتر در معرض تنش‌ها قرار گرفته‌اند که همخوانی با مشاهده‌های صحرایی و نتایج سنگ نگاری این بخش از توده را نشان می‌دهد.

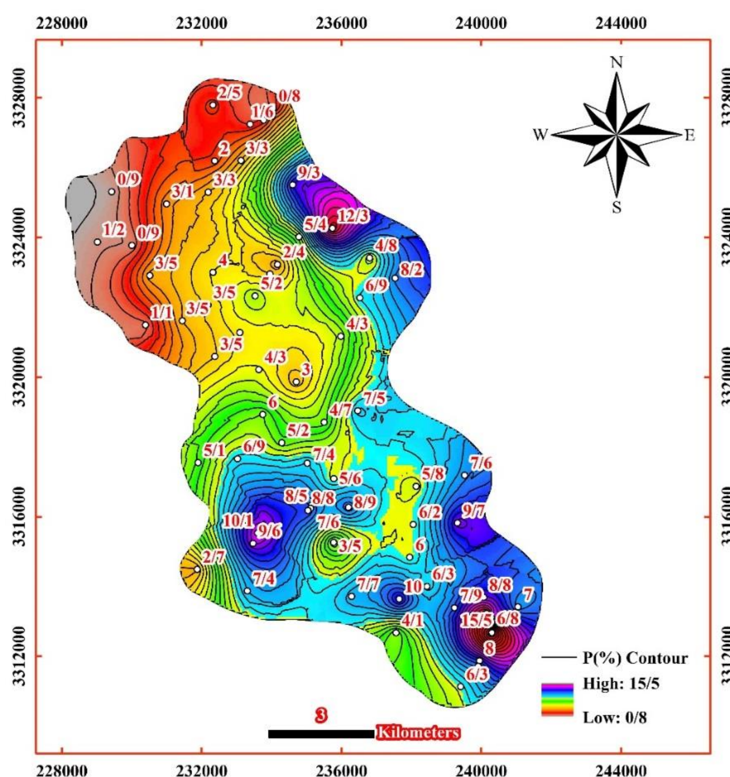


شکل ۶ الف) نقشه تغییرات میل خطواره‌های مغناطیسی. ب) برجسته‌نگار نشانگر خطواره‌های مغناطیسی و نمودار پربندی آن‌ها در توده گرانیتوئیدی گراغه.



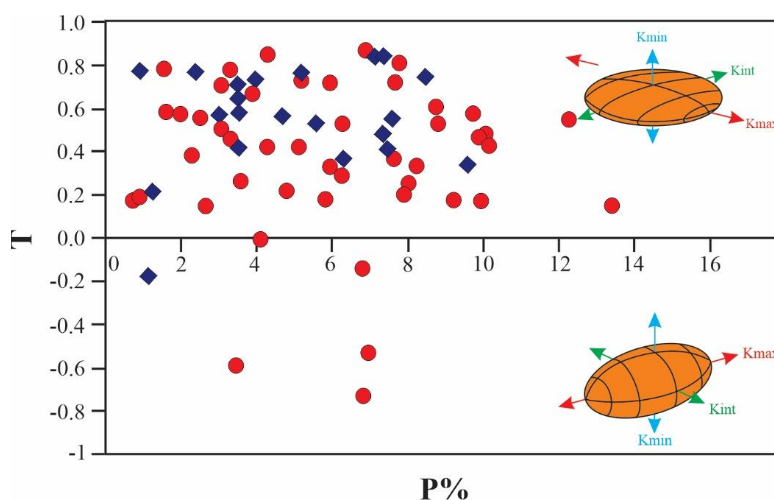
شکل ۷ نقشه تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی میانگین (Km) در توده گرانیتوئیدی گراغه.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]

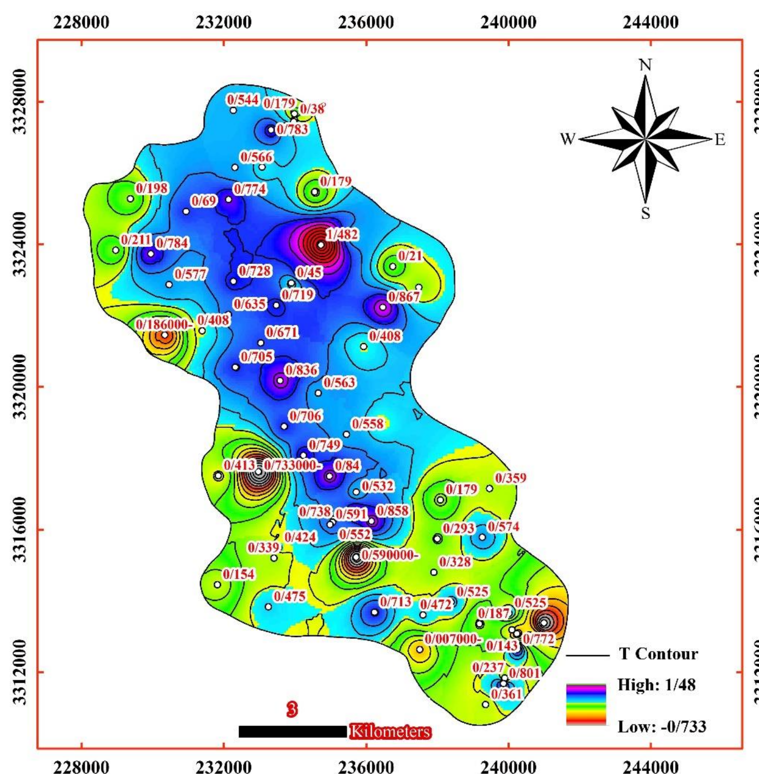


شکل ۸ نقشه درصد ناهمسانگردی مغناطیسی (P%) در توده گرانیتوئیدی گراغه.

متغیر شکل (T) توده گرانیتوئیدی گراغه بین ۰٫۷۳۳− تا ۱ در تغییر است. مقدار این پارامتر برای بیشتر نمونه‌های سنگی مثبت بوده و بیانگر بیضوی مغناطیسی کلوچه‌ای و یا صفحه‌ای شکل است (شکل ۹). مقدار مثبت T در بخش‌های شمال (جز بخش‌های شمال غرب منطقه)، مرکزی و بخش‌های کمی از جنوب توده گراغه بیشتر است. بررسی ها نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد از نمونه‌ها از نوع صفحه‌ای شکل (T صفر تا ۱ +) و حدود ۱۰ درصد آن‌ها از نوع دوکی شکل (T صفر تا ۱ -) هستند (شکل ۱۰).



شکل ۹ نمودار تغییرات P نسبت به T در همه نمونه‌های سنگی توده گرانیتوئیدی گراغه.



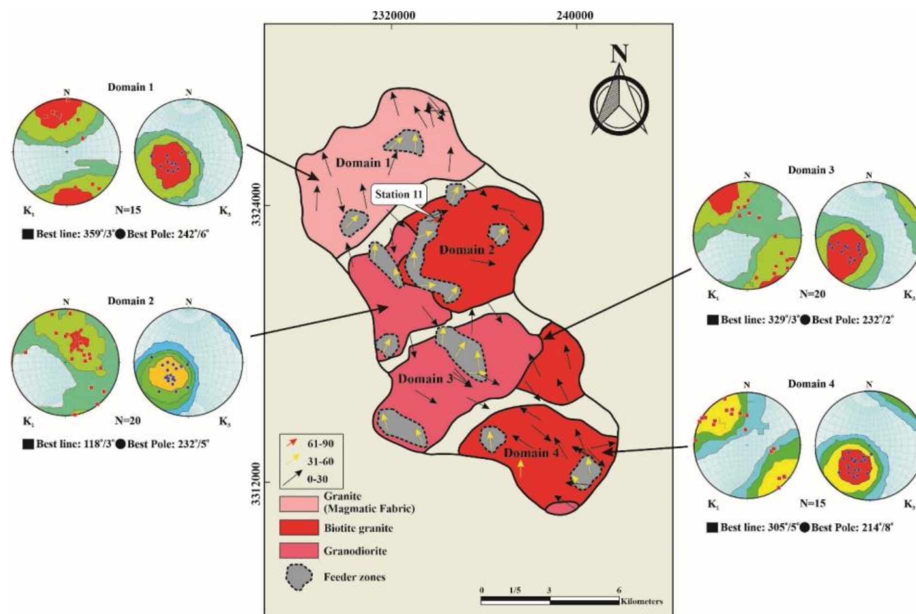
شکل ۱۰ نقشه تغییرات متغیر شکل (T) در توده گرانیتوئیدی گراغه.

پهنه‌بندی توده گرانیتوئیدی گراغه

با توجه به روند خطوارگی‌ها و راستای برگوارگی‌های مغناطیسی و بازدیدهای صحرایی، نتایج سنگ‌نگاری و ریزساختی و ترکیب سنگ‌شناسی، توده گرانیتوئیدی گراغه را می‌توان به چهار پهنه اصلی با نام‌های (۱) تا (۴) تفکیک نمود (شکل ۱۱).

پهنه (۱) شامل ۱۵ ایستگاه از بیوتیت گرانیت‌های دانه درشت است که در بخش شمالی و کم ارتفاع منطقه واقع هستند (شکل ۱۱). خطوارگی مغناطیسی در این پهنه بیشتر دارای روند شمالی و جنوبی است و به طور میانگین ویژگی‌های N۳۵۹/۳ دارد. همچنین بهترین قطب برگوارگی‌ها در این پهنه برابر با N۲۴۲/۶ است. در این پهنه خطوارگی و برگوارگی‌های مغناطیسی با شیب متوسط هستند و دو ایستگاه با الگوی خطوارگی شیب بالا (N۴۷/۷ و N۵۲/۵) و برگوارگی‌ها نیز موازی با لبه توده قرار دارند. در واقع این ایستگاه‌ها در این پهنه نشانگر مناطق تغذیه کننده ماگما هستند. بر پایه اندازه‌گیری‌های مغناطیسی انجام شده، کمترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی با میانگین ۱۲۴٫۵ µSI مربوط به این پهنه است. کمترین پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در پهنه (۱) مربوط به ایستگاه شماره ۲۷ در لبه توده و برابر با ۷۱٫۶۶ µSI است. متغیر شکل در این پهنه صفحه‌ای و در گستره ۰٫۳۸ تا ۰٫۷۸۴ است.

پهنه (۲) در بخش مرکزی توده واقع بوده و شامل ۲۲ ایستگاه است. حدود ۶۰ درصد سنگ‌های این پهنه را گرانودیوریت‌ها و ۴۰ درصد دیگر را بیوتیت گرانیت‌ها تشکیل می‌دهند. بیشتر خطواره‌های آن روندهای شمالی- جنوبی تا شمال‌شرق- جنوب‌غرب را نشان می‌دهند. قطب برگواره‌ها نیز دارای روند و میل N۲۳۰/۱ است (شکل ۱۱). ایستگاه ۱۱ در بخش شمالی این پهنه با الگوی خطواره بسیار بالا (N۷۴/۴) نسبت به سایر خطواره‌های توده است. این پهنه دارای بیشترین مناطق تغذیه ماگما بوده که اصلی‌ترین منطقه تغذیه ماگما ایستگاه ۱۱ است. بیشتر ایستگاه‌های موجود در این پهنه دچار ریزساخت‌های جامد دمای پایین تا متوسط شده‌اند. میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در این پهنه ۱۳۰٫۸۷ µSI است. متغیر شکل نیز با میانگین ۰٫۵۷ در گستره ۰٫۱۸۶- تا ۱٫۴۸۲+ در این پهنه تغییر می‌کند.



شکل ۱۱ نقشه پهنه‌های مغناطیسی توده گرانیتوئیدی گراغه که بر پایه مشخصه‌های مغناطیسی و ویژگی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی سنگ‌های سازنده توده نفوذی مورد بررسی رسم شده است. در برجسته نگارهای نشان‌دهنده خطوارگی‌های مغناطیسی (K_1)، موقعیت استرین میانگین آن‌ها با نشانه مربع مشخص شده است. در برجسته نگارهای نشان‌دهنده برگوارگی‌های مغناطیسی (K_3)، موقعیت بهترین میانگین قطب برگوارگی آن‌ها با نشانه دایره مشخص شده است. شمار ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در هر پهنه با نماد N نشان داده شده است.

پهنه (۳) با در برداشتن ۲۰ ایستگاه در بخش مرکزی توده قرار دارد. ۷۰ درصد سنگ‌های این پهنه گرانودیوریت و ۳۰ درصد دیگر بیوتیت گرانیت‌ها هستند. این پهنه نیز همانند پهنه (۲) از ارتفاعات مرکزی توده بشمار می‌رود. در این پهنه، میانگین خطواره‌های مغناطیسی N۳۲۹/۵ است (شکل ۱۱). خطواره‌های مغناطیسی در این پهنه شیب کمتر از ۵۰ درجه و بیشتر روند شمالی- جنوبی دارند و خطوارگی‌ها خلاف جهت هم هستند. ایستگاه‌ها با الگوی خطوارگی بالا بین ۳۳٫۲ تا ۴۷ درجه مناطق تغذیه ماگما هستند. قطب برگواره‌ها دارای روند و میل N۲۳۲/۲ است (شکل ۱۱). ریزساخت‌های موجود در این پهنه از نوع حالت جامد دمای پایین تا متوسط هستند. در این پهنه، پذیرفتاری مغناطیسی دارای میانگین µSI ۱۸۰٫۶۶ بوده که کمترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به ایستگاه ۵۸ با مقدار µSI ۱۰٫۲۸ است. متغیر شکل نیز در این پهنه از ۰٫۵۹- (خطی) تا ۰٫۸۵۸+ (صفحه‌ای) در تغییر است.

پهنه (۴) که از ۱۵ ایستگاه تشکیل شده است و در بخش جنوبی توده قرار دارد. ترکیب ۸۰ درصد سنگ‌های این پهنه بیوتیت گرانیت و ۲۰ درصد آنها گرانودیوریت است. دگرشکلی های دیده شده در این پهنه بیشتر از نوع حالت جامد در دمای پایین تا متوسط هستند. روند بیشتر خطواره‌ها در این پهنه شمال‌غرب- جنوب‌شرق با شیب کم است و بطور میانگین ویژگی‌های N۳۰۵/۵ دارند. در این پهنه، تنها چهار ایستگاه دارای شیب بین ۳۰٫۸ تا ۵۶٫۶ هستند و به نظر می‌رسد که سه ایستگاه با شیب بالای ۳۵ و روندهای شمالی- جنوبی در بخش‌های غربی و جنوب‌شرقی از مناطق تغذیه ماگما بشمار می‌روند. برجسته نگار نشان‌دهنده وضعیت خطوارگی‌های مغناطیسی در این پهنه از توده گرانیتوئیدی گراغه در شکل ۱۱ آورده شده است. همچنین قطب برگوارگی‌ها در این پهنه بطور میانگین برابر N۲۱۴/۶ است. بر پایه اندازه‌گیری‌های انجام شده، میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در این پهنه µSI ۱۴۴٫۴ است. همچنین بیشترین میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در این پهنه با مقدار µSI ۳۰۱ مربوط به ایستگاه ۸ است. از کل ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در این پهنه، ۱۲ ایستگاه با مقادیر T مثبت (۰٫۱۴۳+ تا ۰٫۸۰۱+) و ۳ ایستگاه با مقادیر T منفی (۰٫۵۳۸- تا ۰٫۰۰۷-) به ترتیب بیانگر شکل کلوچه‌ای و دوکی هستند.

مدل جایگیری توده گرانیتوئیدی گراغه

با توجه به الگوی تغییرات برگواره‌ها و خطواره‌های مغناطیسی و پهنه‌هایی که بر اساس آن‌ها تعیین شده‌اند، به نظر می‌رسد که ماگماهای سازنده توده گرانیتوئیدی گراغه در یک پهنه برشی با

راستای شمال غرب- جنوب شرق نفوذ کرده اند، به طوری که در مرحله اول، بیوتیت گرانیت‌های به سن ۰٫۷± ۴۴٫۵ میلیون سال [۱۲] نخستین ماگمایی بوده‌اند که بصورت بستر و سقف لاکولیت با شیب ۴۵ درجه در راستای شمال شرق درون سنگ‌های میزبان خود جای گرفته‌اند. در مرحله دوم ماگمای گرانودیوریتی به سن ۰٫۶± ۴۴٫۳ میلیون سال [۱۲] با فاصله زمانی بسیار کمتری به درون لاکولیت، تزریق شده است (شکل ۱۲). فضای لازم برای جایگیری توده احتمال بسیار در اثر حرکت گسل‌های راستا لغز و ایجاد حوضه‌های کششی ایجاد شده است. گرما و سیال‌های آزاد شده از دو پالس ماگمایی منجر به دگرگونی مجاورتی درجه ضعیف تا متوسط سنگ‌های پیرامون توده گرانیتوئیدی گراغه شده اند. پس از جایگیری و طی سرد شدن، سامانه تنش با راستای شمالی و جنوبی بر توده اثر گذاشته است که شواهد این امر را به صورت دگرشکلی‌های حالت جامد دمای پایین در سمت شرق و غرب توده گرانیتوئیدی گراغه و دگرشکلی‌های حالت جامد دمای متوسط تا بالا در بخش‌های مرکزی توده می‌توان مشاهده نمود. تعداد دایک‌ها در توده گرانیتوئیدی گراغه کم است که بیشتر در راستایی تقریبی شرقی - غربی و به ندرت شمالی - جنوبی هستند. به احتمال بسیار توده گرانیتوئیدی گراغه در معرض تنش‌های غالب موجود در منطقه با راستایی شمال‌شرق- جنوب غرب تا شرقی- غربی بوده است و ماگمای دیوریتی سرچشمه گرفته از گوشته به درون فضاهای باز شده نفوذ کرده و سبب تشکیل دایک ها موجود در توده گردیده است.

برداشت

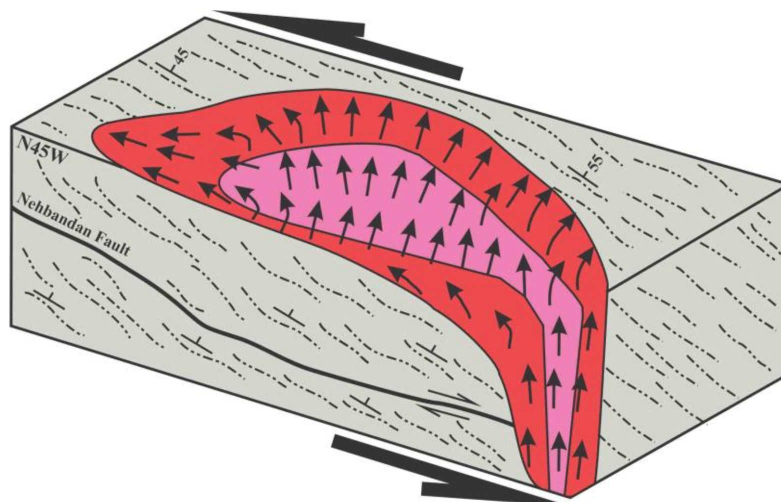
بر پایه بررسی‌های سنگ‌نگاری، بیوتیت گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها حجم اصلی توده گرانیتوئیدی گراغه را شامل می‌شوند که پس از استقرار، بخش‌هایی از آن‌ها دچار میلونیت-زایی شده‌اند.

با بررسی‌های ریزساختاری، وجود بافت‌های ماگمایی، نیمه ماگمایی و حالت جامد دمای پایین تا بالا در سنگ‌ها، نشان دهنده غالب بودن دگرشکلی‌های دما پایین تا بالا و به مقدار کم بافت‌های ماگمایی در منطقه است.

با بررسی ناهمسانگردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) مشخص گردید که مناطق با پذیرفتاری مغناطیسی میانگین بزرگتر دارای کانی‌های بیوتیت بیشتری بوده و با حضور فازهای آهن‌دار سازگار هستند. مناطق با پذیرفتاری مغناطیسی کم دارای کانی بیوتیت هستند که عامل اصلی پذیرفتاری مغناطیسی در توده بوده است.

در بیشتر نمونه‌ها، متغیر شکل مثبت و صفحه‌ای است. درجه ناهمسانگردی مغناطیسی در بیشتر مناطق کم بوده، اما در بخش‌های شرقی و جنوبی توده گراغه افزایش یافته است که می‌تواند نشان‌دهنده اثر بیشتر دگرشکلی‌ها باشد.

بر پایه شواهد مغناطیسی و نظام زمین‌ساختی منطقه، می‌توان بالا آمدگی ماگما با ترکیب بیوتیت گرانیت را بعنوان نخستین مرحله ماگمایی که بصورت لاکولیت و ماگمای گرانودیوریتی به فاصله زمانی بسیار کمتر به درون لاکولیت دومین مرحله ماگمایی برای مدل جایگیری توده گرانیتوئیدی گراغه تصور کرد.



شکل ۱۲ مدل سه بعدی جایگیری توده گرانیتوئیدی گراغه که بر اساس داده‌های حاصل از روش AMS حاصل شده است.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.3.395]

قدردانی

نویسندگان مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به سبب حمایت‌های مالی و معنوی از انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند. نویسندگان همچنین از زحمات آقایان دکتر محسن جامی، مهندس شهاب البرزیان جونقانی و مهندس محسن حمیدی که در انجام بررسی‌های صحرایی و مغزه‌گیری همراهی و یاری کردند، سپاسگزاری می‌کنند.

مراجع

[1] Bouchez J.L., *“Magnetic susceptibility anisotropy and fabrics in granites”*, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science 1 (330) (2000) 1-14.

[2] Archanjo C.J, Bouchez J.L, Corsini M., Vauchez A., *“The Pombal granite pluton: magnetic fabric, emplacement and relationships with the Brasiliano strike-slip setting of NE Brazil (Paraiba State)”*, Journal of Structural Geology 16(3) (1994) 323-35.

[3] Mamtani M.A., Greiling R.O., *“Granite emplacement and its relation with regional deformation in the Aravalli Mountain Belt (India)—inferences from magnetic fabric”*, Journal of Structural Geology 27(11) (2005) 2008-2029.

[4] Neves S.P., Mariano G., Beltrão B.A., Correia P.B., *“Emplacement and deformation of the Cachoeirinha pluton (Borborema province, NE Brazil) inferred through petrostructural studies: constraints on regional strain fields”*, Journal of South American Earth Sciences 19(2) (2005) 127-41.

[5] Salazar C.A., Archanjo C.J., Babinski M., Liu D., *“Magnetic fabric and zircon U–Pb geochronology of the Itaóca pluton: implications for the Brasiliano deformation of the southern Ribeira belt (SE Brazil)”*, Journal of South American Earth Sciences 26(3) (2008) 286-99.

[6] Aguado B.V., Azevedo M.R., Nolan J., Medina J., Costa M.M., Corfu F., Catalán J.M., *“Granite emplacement at the termination of a major Variscan transcurrent shear zone: The late collisional Viseu batholith”*, Journal of Structural Geology 98 (2017) 15-37.

[7] Sadeghian M., Bouchez J.L., Nedelec A., Siqueira R., Valizadeh M.V., *“The granite pluton of Zahedan (SE Iran): a petrological and magnetic fabric study of a syntectonic sill emplaced in a transtensional setting”*, Journal of Asian Earth Sciences 25(2) (2005) 301-27.

[8] Tirrul R., Bell I.R., Griffis R.J., Camp V.E, *“The Sistan suture zone of eastern Iran”*, Geological Society of America Bulletin 94(1) (1983) 134-50.

[9] Boomeri M., Mojadadi H., Biabangard H., *“Petrography and geochemistry of igneous rocks and Sb and Au mineralization in Sefidsang and Dargiaban areas, southeastern Iran”*, Iranian Journal of Petrology 9(3) (2018) 195-218.

[10] Rezaei-Kahkhaei M., Corfu F., Sheykhi M., Ghasemi H., Shi Y., *“Mineral chemistry and ages of the Eocene Gapdan granitoid pluton and related dykes (Sistan suture zone, eastern Iran): multi-stage emplacement of a zoned pluton during progressive deformation and exhumation”*, Journal of Asian Earth Sciences 216 (2021) 104813.

[11] Rezaei-Kahkhaei M., Corfu F., Galindo C., Rahbar R., Ghasemi H., *“Adakite genesis and plate convergent process: Constraints from whole rock and mineral chemistry, Sr, Nd, Pb isotopic compositions and U-Pb ages of the Lakhshak magmatic suite East Iran”*, Lithos 426 (2022) 106806.

[12] Sarhadi N., Rezaei-Kahkhaei M., Shi Y., Erambert M., Ghasemi H., *“Thermobarometric and structural constraints on multistage emplacement mechanism of the Garagheh pluton, Sistan Suture Zone (SE Iran)”*, Journal of Asian Earth Sciences 250 (2023) 105624.

[13] Tarling D., Hrouda F., *“Magnetic anisotropy of rocks”*, Springer Science & Business Media (1993).

[14] Lanza R., Meloni A., *“The Earth’s Magnetic Field”*, Springer Berlin Heidelberg (2006).

[15] Hrouda F., *“Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics”*, Geophys Surveys 5 (1982) 37-82.

[16] Rezaei-Kahkhaei M., Kananian A., Esmaeily D., Asiabanha A., *“Geochemistry of the Zargoli Granite, Implications for development of the Sistan Suture Zone, southeastern Iran”*, Island Arc 19 (2010) 259-276.

[17] Vernon R.H., *“Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow”*, Visual Geosciences 5 (2000) 1-23.

[18] Ceccato A., Menegon L., Pennacchioni G., Morales L.F., *“Myrmekite and strain weakening in granitoid mylonites”*, Solid Earth 9(6) (2018) 399-419.

[19] Warr L.N., *“Recommended abbreviations for the names of clay minerals and associated phases”*, Clay Miner 55 (3) (2020) 261-264.